

デスクトップファクトリ用ミニチュアロボットの変位計測

Displacement measurement of a miniature robot used in a desktop factory

鳥井昭宏¹、道木加絵²、植田明照¹、林亮³

Akihiro TORII, Kae DOKI, Akiteru UEDA, Akira HAYASHI

Abstract: A rotational displacement of a miniature robot, which is used in a desktop factory, is described. The robot is about 3 cm in diameter and about 40 g in weight. The robot consists of three piezoelectric elements and they are operated by triangular waveforms. The robot is so small that small sensors are used. The displacement of the robot is measured by three position sensitive detectors, which are mounted on the robot. The measurement principle is described. The rotational displacement is in the order of mrad. However, the robot yields linear displacement when the control signals for the rotational displacement are applied to the robot.

1. はじめに

高度に集積化された製品の登場にともなって、微小な機械部品の加工と組立が多数要求されている。しかし、それらの行程を担当する工作機械の小形化は進行は遅く、小さい部品の加工組立はスペースファクタ、消費エネルギー、コストの面で相対的に合理性を欠く結果となっている。小形部品の製造には小形の製造装置が望ましいとの考えがあり、デスクトップファクトリ・デスクトップマニュファクチュアリングと呼ばれる卓上サイズの生産システムが提案されている^{1,2)}。またこれらはマイクロファクトリとも呼ばれている。これらの生産システムのメリットは、(1) 親環境的側面、(2) 経済的側面、(3) 技術的側面、(4) 作業環境的側面などがあげられている³⁾。

これら多数のメリットを有するデスクトップファクトリには多様なアプローチが存在する。自走式のミニチュアロボットの開発と応用などは、その例である^{2,3,4)}。電磁石と圧電素子を組み合わせた自走式の機構と、それらに搭載する精密作業用アクチュエータについて述べている。筆者らはデスクトップファクトリ用のミニチュアロボットを

研究してきた^{5,6)}。数センチメートルサイズのミニチュアロボットがインチワームの原理に従い、あるいはインチワームと類似の原理に従いマイクロメートルレベル・ナノメートルレベルの微小変位を実現した。また、直線変位だけでなく回転変位も可能であった。一方で、動作したミニチュアロボットの位置と姿勢を精度良く計測する必要があり、筆者らはミニチュアロボットに位置計測素子 (PSD) を搭載する計測システムの構築を試みた⁷⁾。

本論文では、デスクトップファクトリを目指したミニチュアロボットの制御手法と変位の計測結果について述べる。この制御手法は従来のインチワームと異なり、圧電素子の印加電圧制御のみによってミニチュアロボットを回転させることが可能である。次章以降で、デスクトップファクトリ用に開発中のミニチュアロボットの構造と回転動作制御信号を述べた上で、ミニチュアロボットの変位計測方法について述べ、最後に実験結果について述べる。

2. ミニチュアロボット

本章では、筆者らが試作検討しているミニチュアロボットの構造および制御信号について述べる。ミニチュアロボットは3個の圧電素子により構成される。初期の段階ではY形に接続したタイプと△形に接続したタイプの両者について検討したが、現在では△形タイプのみを研究対象と

1 愛知工業大学工学部電気学科

2 愛知工業大学工学部機械学科

3 (株)ナノ

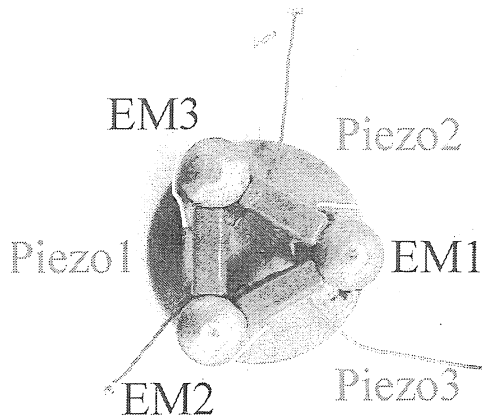


Fig. 1: Photo of a miniature robot (bottom view). Three electromagnets (EM) and three piezoelectric elements (piezos) are used.

している⁵⁾。また、初期段階に製作したミニチュアロボットは3個の圧電素子の接続点に電磁石を取り付けたインチワームであった。インチワームは電磁石などの吸着力を発生する素子と圧電素子などの変位を発生する素子を組み合わせたアクチュエータであるが、制御素子数が多くなる点が問題である。例えば、直線変位を行うためには2個の吸着素子と1個の変位素子が必要になる。そのため、現在では電磁石を用いない制御手法を検討している^{8,9,10)}。これは被制御素子数を減らすことによる制御信号および制御回路の簡略化を期待しているためである。

Fig. 1はミニチュアロボットの写真である。長さ10mmの圧電素子を正三角形状に接続しており、全体の大きさは直径28mmである。ミニチュアロボットの大きさは、使用する積層型圧電素子の大きさに依存し、数cm程度の大きさが適している。ミニチュアロボットの上部は光学素子や工作ジグなどの搭載を前提とした平坦な円盤ステージ状になっている。後述のPSDを用いたミニチュアロボットの位置姿勢計測では、このステージ上に位置計測用のPSDを搭載する。全体の質量は40g程度であり、大部分は円盤ステージの質量である。

ミニチュアロボットの回転動作制御信号には三角波を用いる。3個の圧電素子への印加電圧波形をFig. 2に示す。これまでは圧電素子の急速変形を用いた方形波状の入力信号を用いていた。圧電素子への印加電圧が急速に変化するとき、すなわち圧電素子が急速に伸縮するときに慣性

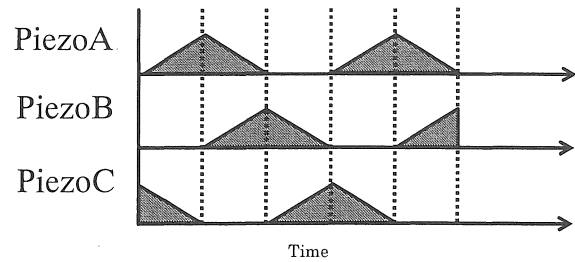


Fig. 2: Schematic diagram of the control signals.

が大きく変化し、ミニチュアロボットが変位する。微小な変位の繰り返しによってミニチュアロボットは回転動作を行った。この動作原理は、静止摩擦と動摩擦の間の移り変わりを利用しているため、動作が不安定になる傾向があった。そこで、本論文では三角波信号を制御信号とした。三角波を用いることによりミニチュアロボットを支えるすべての脚は滑っている状態であり、すなわち、すべての脚が動摩擦の状態であり、動摩擦は静摩擦と比較してばらつきが少ない。方形波を用いる場合も三角波を用いる場合も、制御波形の位相を入れ替えることにより回転方向を逆転させることが可能である。圧電素子への制御信号は、パーソナルコンピュータで作成し、増幅器を介して圧電素子に印加される。

3. 位置姿勢計測システム

ミニチュアロボットの変位計測には様々な方法が提案されている¹¹⁾。本論文では、3個のPSDを用いたミニチュアロボット用計測システムについて述べる⁷⁾。PSDは均一な光抵抗層を持つ光学素子で、一次元変位を計測するPSDは両端が電極となっている。光が照射された地点に光電流が発生し、発生した電流は両端の電極方向に流れる。発生する電流は光の強度に比例し、両電極から流出する電流は抵抗層の長さ、すなわち光の照射点と電極間距離に反比例する。したがって、両電極から流出する電流量を計測することにより、光の照射地点が求められる。具体的には、PSD上の中心をゼロとした場合の光照射点の座標は、両端の電極からの流出電流 I_1 , I_2 を用いて次式で表される。

$$x = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) \quad (1)$$

ミニチュアロボットの位置と姿勢は、空間的に等角度間隔におかれた3個のレーザが定める座標系によって与え

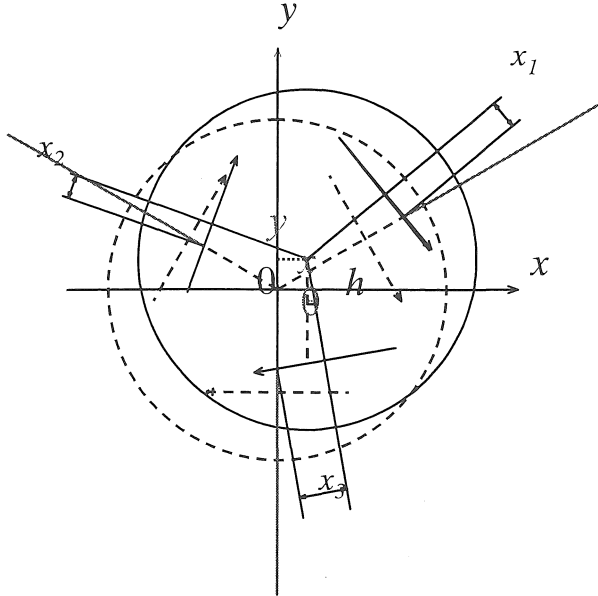


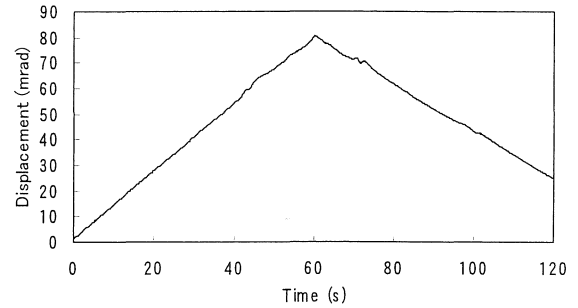
Fig. 3: Coordinates of the measurement system. Three lasers determine the origin.

られる。レーザの交点を原点として、y軸の負の方向に置かれた1個のレーザと、そのレーザから120度の等角度間隔に置かれた2個のレーザを用いる。それぞれのレーザ光線が3個のPSD上に照射され、PSD上のレーザスポットの位置をもとに、ミニチュアロボットの中心座標が求められる。ミニチュアロボットの位置 \$x, y\$ と姿勢 \$\theta\$ は、PSD上のレーザスポットの位置 \$x_1, x_2, x_3\$ を用いて次の式で表される。

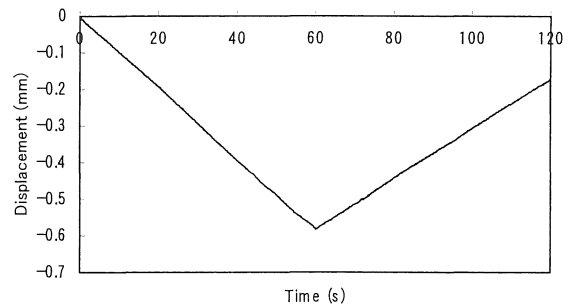
$$\left. \begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \right) \\ x &= \left(x_3 - \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \right) \cos \theta \\ y &= \frac{1}{\sqrt{3}} (x_1 - x_2) \cos \theta \end{aligned} \right\} (2)$$

4. 実験結果

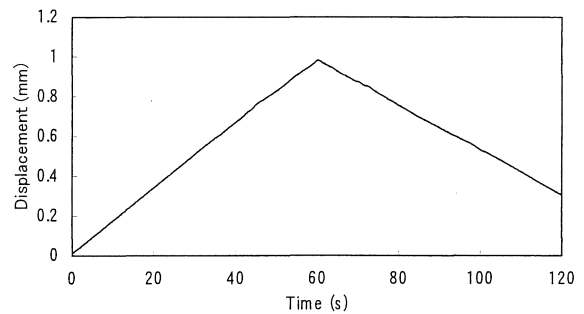
実験では圧電素子への印加電圧の最大値を50Vとした。使用した圧電素子の特性より、最大で0.25μm伸びる。制御周波数は10kHzとした。制御入力に右左回転用の入力信号を1秒間与えた後に、制御信号の位相を変更し、逆方向に1秒間回転させた。3個のPSDの出力であるPSD表面上のスポット位置を、式(2)を用いてミニチュアロボ



(a) \$\theta\$-displacement



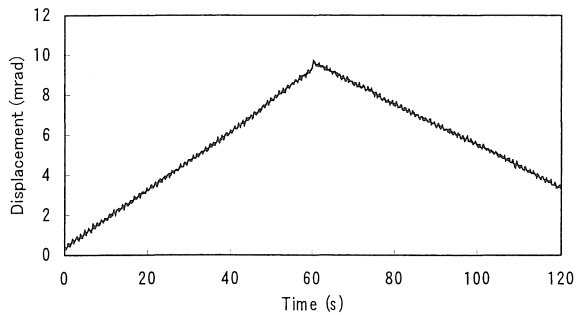
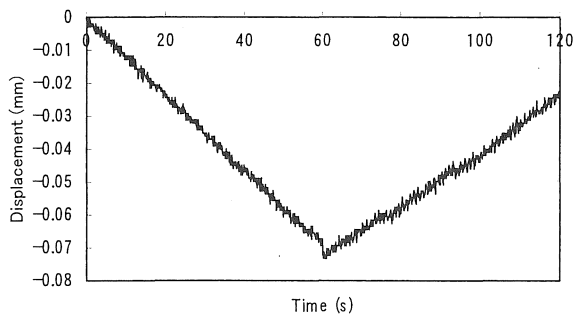
(b) x-displacement



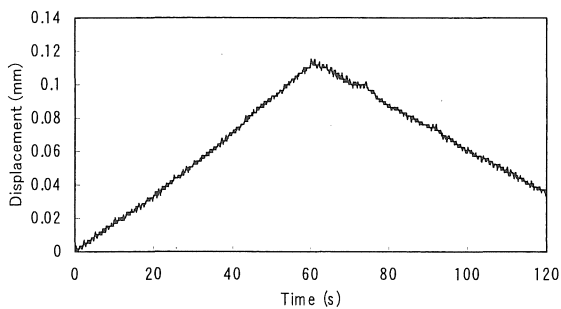
(c) y-displacement

Fig. 4: Rotational and linear displacement at \$f=10\$ kHz.

ット的位置と姿勢に変換すると、Fig. 4 が得られる。60秒間、反時計方向に回転し、その後の60秒間、時計方向に回転させた。初めの60秒間で反時計方向に80mrad回転し、続く60秒間で時計方向に60mrad回転した。同時に直線変位(x軸方向に最大0.6mm程度、y軸方向に最大1.0mm程度)が生じていることがわかる。同様に制御周波数を1kHz, 100Hzとした場合の結果をFig. 5とFig. 6に示す。制御信号に従った回転を行っていること、制御信号の回転方向を逆転することにより、回転方向も逆になることがわかる。回転動作の制御信号を逆転させるこ

(a) θ -displacement

(b) x-displacement

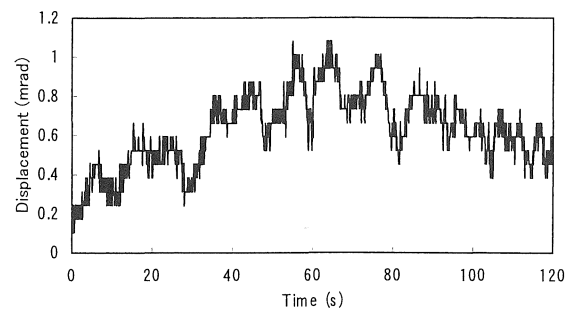
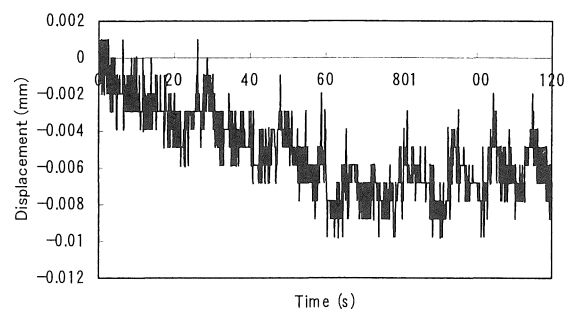


(c) y-displacement

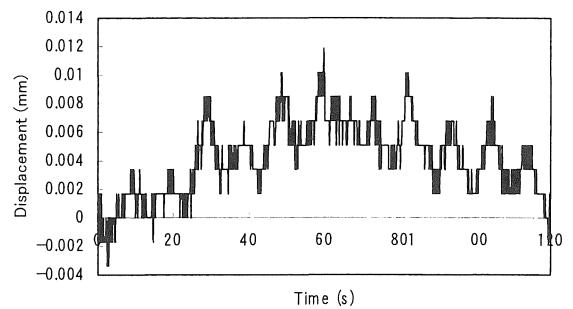
Fig. 5: Rotational and linear displacement at $f=1$ kHz.

とにより逆になること、変位量も概ね等しいことがわかる。しかしながら、回転と同時に直線変位が生じていることがわかる。Fig.5 の x 軸方向の変位は最大-0.07mm、y 軸方向の変位は最大 0.12mm、Fig.6 においては、ノイズの多い波形であるが、前者が-0.008mm、後者が 0.008mm 程度である。回転変位と直線変位の変位量は概ね制御周波数に比例しているが、今後はより多数のデータを収集し、制御周波数と変位量に関する詳細な検討を行う必要がある。

入力制御波形を三角波とした制御は、従来行われてきた方形波を用いた制御と比較して良好な動作が行われる。

(a) θ -displacement

(b) x-displacement



(c) y-displacement

Fig. 6: Rotational and linear displacement at $f=100$ Hz.

これは、方形波を用いた場合には静摩擦と動摩擦の両者が影響するが、三角波を用いた場合には静摩擦の影響を受けず動摩擦のみに支配されるためと考えている。動摩擦は速度の影響を受けにくい一定値と考えられるが、静摩擦は微視的な速度の影響を受け方形波状の入力に対しては試行毎の差が大きいためと予想される。

ミニチュアロボットの中心座標の例を Fig. 7 に示す。制御開始時の座標を原点とし、Fig. 4 の場合の中心座標を示した。Fig.4 と Fig.7 より、ミニチュアロボットは直線上を往復していることがわかる。原点より出発し、最大で

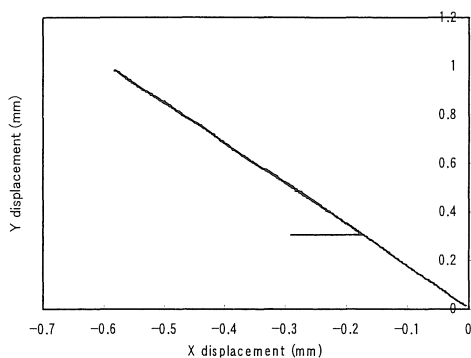


Fig. 7: Center of the robot at $f = 10$ kHz.

$x = -0.8$ mm, $y = 1.0$ mm 程度の地点まで移動していることがわかる。ただし、原点より出発したミニチュアロボットは原点に戻ることができない。この点に関しても、より詳細な検討が課題として残る。

5. まとめ

本論文では、デスクトップファクトリ用に開発中のミニチュアロボットの動作について述べた。ミニチュアロボットの構造と計測方法を述べた上で、ミニチュアロボットの回転動作の計測を繰り返し、計測結果について述べた。ミニチュアロボットは3個の積層型圧電素子を正三角形形状に接続した簡単な構造である。ミニチュアロボットには3個の位置計測用 PSD を搭載した。各 PSD にはレーザー光線を照射し、光線のスポット位置に基づいてミニチュアロボットの位置と姿勢を求めた。実験条件の下では、1秒間の変位量は 1 rad から 80 rad 程度であった。回転変位と同時に直線変位が生じた。直線変位の変位量は、 $8\mu\text{m}$ から 1 mm 程度であった。今後は回転中心保持用の案内の導入や、視覚情報を用いた回転中心保持用の制御アルゴリズムなどを検討し、導入する予定である。

本研究は、愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究の一環として実施しました。関係各位にお礼を申し上げます。

文献

- 岡崎祐一、「マイクロファクトリ」、精密工学会誌、Vol. 68, No. 4, pp. 491-494, 2002

- 青山尚之、岩崎隆之、佐々木彰、深谷治助、下河辺明、「小形自走機械群による超精密生産システム（第1報）」、精密工学会誌、Vol.59, No. 6, pp. 1007-1012, 1993
- 淵脇大海、庄司裕一、T. Chomchana、青山尚之、「顕微作業用 xyθ小型自走機械の開発（第1報）」、精密工学会誌、Vol. 63, No. 3, pp. 403-408, 2002
- 青山尚之、新野弘司、「小形自走機械群による超精密生産システム（第3報）」、精密工学会誌、Vol. 67, No. 11, pp. 1792- 1796, 2001
- 加藤治奈、早川和明、鳥井昭宏、植田明照、「圧電素子と電磁石を用いた XYθアクチュエータ」、電気学会論文誌 C、Vol. 119-C, No. 1, pp. 57-62, 1999
- 鳥井昭宏、加藤治奈、植田明照、「電磁石を用いた小形自走アクチュエータ」、電気学会論文誌 C、Vol. 120-C, No. 1, pp. 40-45, 2000
- 川根祐輔、鳥井昭宏、道木加絵、植田明照、「PSD を搭載したミニチュアロボットの位置姿勢計測」、電気学会論文誌 C、EIS、Vol. 123, No. 12, pp. 2152-2159, 2003
- A. Torii, R. Fukui, A. Ueda, "A miniature robot for a rotary stage driven by on/off controlled piezoelectric elements", Proc. of the 3rd euspen international conference, Eindhoven, the Netherlands, pp. 159-162, May, 2002
- A. Torii, Y. Fukaya, K. Doki, A. Ueda, "Linear displacement of a miniature robot using on/off controlled piezoelectric elements", Proceed. of the euspen international topical conference, Aachen, Germany, pp. 105-106, May, 2003
- A. Torii, Y. Fukaya, K. Doki, A. Ueda, "Motion of a miniature robot using three piezoelectric elements controlled by rectangular voltage", J. of robotics and mechatronics, Vol. 15, No. 6, pp. 602-608, 2003
- 岩田宗之、高橋英男、佐々木健、高野正晴、「LED 灯台を用いた移動ロボット用位置姿勢検出システム」、精密工学会誌、Vol. 61, No.11, pp. 1579-1583, 1995

(受理 平成 16 年 4 月 30 日)